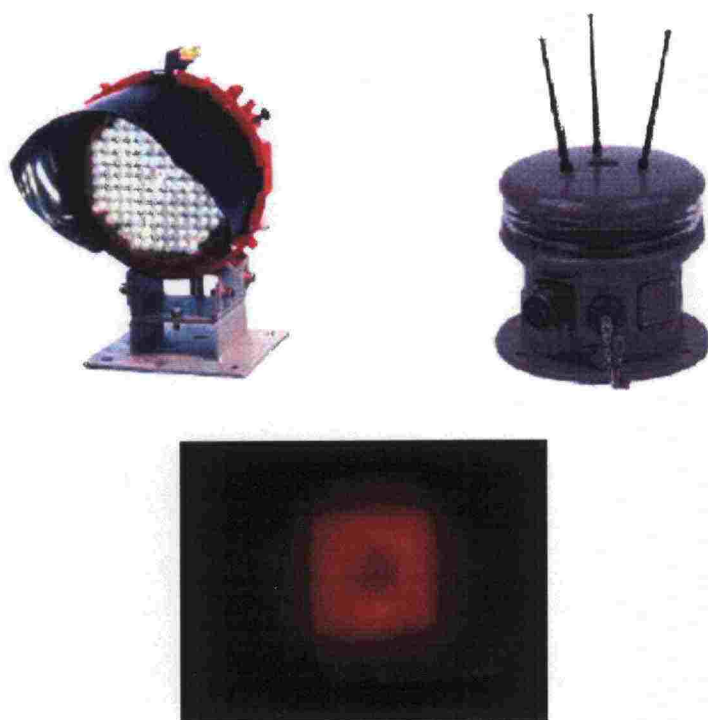


# LED -VALOTEKNIikka LIIKENTEE VALO-OHJAUksESSA

Tutkimus valodiodien ominaisuuksista



 Merenkulkulaitos

Helsinki 2004

ISSN 1456 - 9442

|   |                |   |                    |
|---|----------------|---|--------------------|
| Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri)<br>Tapani Nurmi, TTY Tehoelektroniikan laitos  |                | Julkaisun laji<br>Merenkulkulaitoksen sisäisiä julkaisuja |                    |
| TEKES –projekti no. 40511/01 ja 40430/02  |                | Toimeksiantaja<br>Merenkulkulaitos, Tielaitos, Sabik Oy   |                    |
|   |                | Toimielimen asettamispäivämäärä                           |                    |
| Julkaisun nimi<br><b>LEDIEN KÄYTTÖ LIIKENTEEN VALO-OHJAUKSESSA</b>  |                |   |                    |
| <p>Tiivistelmä</p> <p>Ledien käyttö lisääntyy voimakkaasti niin rautateiden, lentokenttien, tieliikenteen kuin myös meriliikenteen ohjausjärjestelmissä ja turvalaitteissa. Ledit antavat selvästi voimakkaamman aistihavainnon kuin vastaava hehkulampulla aikaansaatu valo ja niillä on mahdollisuus saavuttaa myös pienempi energiankulutus.</p> <p>Tällä hetkellä led –turvalaitteiden valoteho ylimitoitetaan. Tarkkaa tietoa ledillä tuotetun valon kantomathasta ei ole, eikä niiden tuottaman aistihavainnon mekanismeista vilkkukäytössä ole laajalti tutkittu. Merenkulkulaitoksen tavoitteena tässä TEKES –projektissa oli tutkia ja selvittää ledien tehollinen valovoima vilkkukäytössä sekä vilkkuaikojen säädön mahdollisuus hehkulampun tuottamaa aistihavaintoa vastaavaksi. Projektissa pyrittiin selvittämään myös ledien käytöstä saatavat energiansäästöt sekä niistä saatava huoltovälihyöty turvalaitteiden kunnossapidossa.</p> <p>Projektissa ”Teholedien käyttö liikenteen valo-ohjauksessa” yhteistyö- ja rahoittajaosapuolina olivat Sabik Oy, Merenkulkulaitos, Tielaitos sekä varsinaisena toteuttajana Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tehoelektroniikan laitos. Kaksivuotinen projekti (2001 – 2003) jakaantui kolmeen osa-alueeseen. Projektin alussa selvitettiin ledien ja valmiiden turvalaitetuotteiden käyttäytymistä eri ympäristön lämpötiloissa sekä selvitettiin eri ohjaustapojen (lähinnä pulssitus) vaikutusta valontuottoon ja energiankulutukseen. Projektissa selvitettiin myös teholedien soveltuvuutta lopputuotteisiin sekä suunniteltiin ja toteutettiin koesarja, jolla pyrittiin selvittämään käytössä olevien laskentamenetelmien (Schmidt-Clausen, Blondel-Rey-Douglas sekä Allard) soveltuvuutta led –valojen tehollisen valovoiman laskentaan.</p> <p>Projektin ensimmäisen vaiheen tulokset antoivat tietoa ledien käyttäytymisestä eri olosuhteissa ja ohjaustavoilla, jotta lopputuotteiden ohjaussovellukset voidaan mitoittaa ja suunnitella oikeiksi.</p> <p>Toinen vaihe tuo toteen sen, että saman tyyppin ledejä on markkinoilla tarjolla useita. Poiijulinssin kanssa mitattuja teholedejä ei voitu vertailla keskenään, koska yhdellä ledillä mitattaessa poiijulinssin lopullista valonjakoa ei ole mahdollista päätellä. Näistä tehtiin mittaukset vain maksimivalovoimista eri etäisyyksillä. Markkinoilla olevista ledeistä löytyi kuitenkin korvaavia, parempia ledejä mm. Sabik Oy:n linjaloiston keltaiselle ledille.</p> <p>Viimeisessä vaiheessa tehtiin koehenkilöille valmisteltu testi ledien tehollisen valovoiman selvittämiseksi. Tällä hetkellä olevat tehollisen valovoiman laskentakaavat perustuvat hehkulampputyypisillä valonlähteillä tehtyihin kokeisiin. Testissä oli huomioitava, että mitattaessa vilkkuvalon tehollista valovoimaa tulokset pitää suhteuttaa katseluolosuhteisiin. Testin tulokset todistavat, ettei Schmidt-Clausenin, Blondel-Rey-Douglasin ja Allardin teoreettiset arvot kiinteästi palavan ledin luminanssin ja ledin kanttiaallon maksimiluminanssin suhteelle pidä paikkaansa. Lisäksi todettiin, että verratessa yhtä aikaa sekä vilkkuvaa että kiinteästi palavaa lediä toisiinsa, eroja ledien luminanssissa on mahdotonta huomata.</p> <p>Ledien tehollinen valovoima vilkkukäytössä sekä vilkkuaikojen säädön mahdollisuus hehkulampun tuottamaa aistihavaintoa vastaavaksi vaatii vielä runsaasti tutkimustyötä ennen kuin mitään ohjeellisia arvoja eri turvalaitteiden säätötavoille voidaan antaa.</p> |                |   |                    |
| Avainsanat (asiasanat)<br>Meriliikenne, valo-ohjaus, valovoima, aistihavainto, led -valo  |                |   |                    |
| Muut tiedot   |                |   |                    |
| Sarjan nimi ja numero<br>Merenkulkulaitoksen julkaisuja 05 / 2004   |                | ISSN<br>1456 - 9442                                       | ISBN               |
| Kokonaissivumäärä<br>3 + 15   | Kieli<br>Suomi | Hinta   | Luottamuksellisuus |
| Jakaja  |                | Kustantaja  |                    |



# 1 Johdanto

Kaksivuotinen TEKES-projekti "Teholedien käyttö liikenteen valo-ohjauksessa" ja kaantui käytännössä kolmeen osa-alueeseen; projektin alussa vuotena selviteltiin ledien ja valmiiden tuotteiden käyttäytymistä eri ympäristön lämpötiloissa sekä selviteltiin eri ohjaustapojen (lähinnä pulssitus) vaikutusta valontuottoon ja energiankulutukseen sekä yksittäisillä ledeillä että lopputuotteille. Projektin loppuosassa tehtiin diplomityö, jossa selviteltiin teholedien soveltuvuutta lopputuotteisiin sekä suunniteltiin ja toteutettiin koesarja, jolla alustavasti selviteltiin käytössä olevien eri laskentamenetelmien soveltuvuutta led-valojen tehollisen valovoiman laskentaan.

## 2 Led mittauksia eri lämpötiloissa ja ohjaustavat

### 2.1 Yleistä

Ledien ominaisuuksia eri lämpötiloissa havainnoitiin kahdella eri tavalla. Yksittäisen ledin antaman valon amplitudia mitattiin eri lämpötiloissa. Lisäksi kaupallisten (Sabik Oy), ledeillä toteutettujen, poijulyhtyjen antaman valon ja niiden ottaman tehon suhdetta verrattiin erilaisilla ohjauksilla eri lämpötiloissa. Merivilkuista poistettiin ohjauspiiri, joten niitä pystyttiin ohjaamaan ulkoisella ohjauksella.

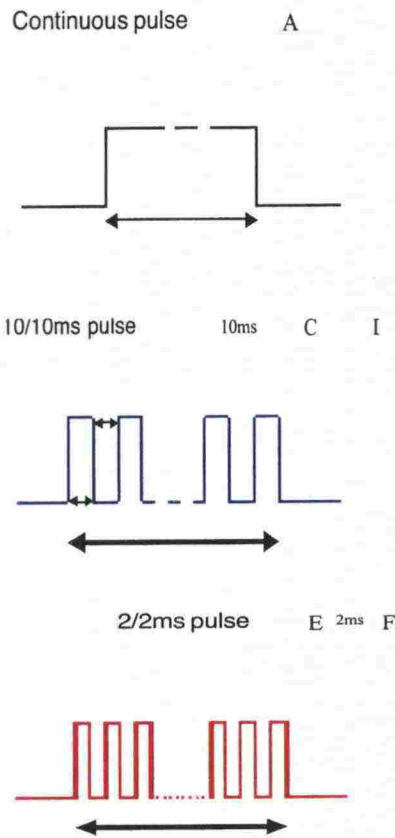
Mittaukset toteutettiin sääkaapissa, jossa oli ikkuna tarkkailua varten. Molemmissa mittauksissa periaate oli sama: Mittava kohde oli sisällä kaapissa ja valokenno ulkopuolella huoneenlämmössä mittaamassa sääkaapissa olevan lasin läpi. Tämä siksi, ettei lämpötilan vaihtelu päässyt vaikuttamaan valokennon toimintaan.

#### 2.1.1 Pulssituksen merkitys

Ledin amplitudin mittauksiin valittiin Sabik Oy:n kanssa käytyjen keskustelujen jälkeen punainen (HPWT-MH00) ledi. Tätä led-tyyppiä mitattiin 20°C, 0°C ja -20°C lämpötiloissa. Mittauksissa lediä ohjattiin seuraavasti: Led oli päällä eri pituisia jaksoja 50 millisekunnista yhteen sekunnin ja aina kaksi sekuntia pois päältä. Päälläoloaikana lediä ohjattiin kolmella eri tavalla. Kiinteällä, koko päälläolojakson kestäväällä pulssilla sekä pulssittamalla päälläolojaksoa 2ms ja 10ms kanttikkaalla ohjauksella. Kaikissa näissä ohjauksissa käytettiin huippuarvoltaan 50mA virtaa lediä kohti. Ledistä mitattiin sen antama valovoima ohjausjakson alussa ja lopussa.

Merivilkkuja (malliltaan LED 155) oli mittauksissa neljää eri väriä: punainen, vihreä, valkoinen ja keltainen. Mittaukset suoritettiin jokaiselle neljälle värille 40°C, 20°C, 0°C ja -20°C lämpötiloissa. Ohjauksena käytettiin 150ms päälläoloaikaa, jota seurasi kolmen sekunnin aika, jolloin vilkkuja ei ohjattu. Päälläoloaikana vilkkuja ohjattiin kolmella tavalla. Kiinteällä 150ms mittaisella ohjauksella sekä pulssittamalla 2ms ja 10ms kanttikkaalla ohjauksella 150ms jaksoa, kuten kuvasta 1 käy ilmi. Kiinteällä ohjauksella käytettiin 10mA virtaa kun taas pulssituksessa käytettiin 20mA vir-

taa per led. Ledeistä mitattiin niiden ottama teho sekä niiden antama valo integroituna 150ms jakson yli.

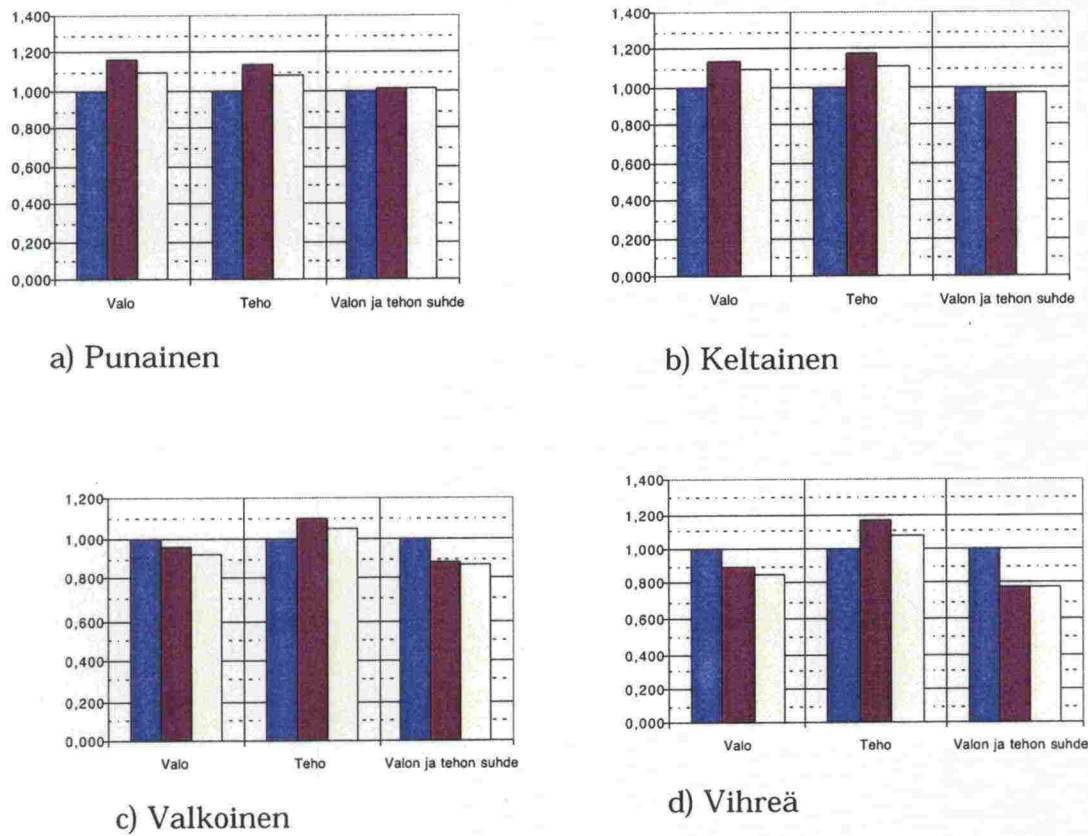


**Kuva 1.** Eri ohjaustavat.

Ennen vilkkujen mittauksia tehdyistä yksittäisen ledin mittaustuloksista havaittiin, että lyhyillä pulsseilla ohjausjakson alussa kaikki pulssitustavat antavat saman suuruisia arvoja ja ohjausjakson lopussa pulssitetut pulssit antavat vain hiukan pienempiä arvoja kuin ohjausjakson alussa mutta kiinteästi ohjattuna ledin antama valo on pulssin loppupäässä pienentynyt selvästi. Ohjausjakson pituuden kasvattaminen ei vaikuta merkittävästi pulssitetusti ohjatun ledin käyttäytymiseen verrattuna lyhyempiin ohjausjaksoihin. Kiinteästi ohjatun ledin antama valo suuruus kuitenkin pienenee sekä valopulssin alku- että loppuosassa ohjausjakson pituuden kasvaessa. Valon heikkeneminen on merkittävää verrattuna pulssitetun ohjauksen antamaan valoon. Lämpötilan muutoksella ei ollut juurikaan merkitystä eri pulssitus tapojen keskinäisiin suhteisiin. Valon intensiteetti kuitenkin kasvoi merkittävästi lämpötilan pienentyessä.

2.2 Mittaukset kaupallisella tuotteella

Merivilkkujen mittaustuloksista (kuva 2) selviää, että pulssitettuna keltainen ja punainen vilkku antavat kirkkaamman valon kuin kiinteästi ohjattu vilkku. Valkoinen ja varsinkin vihreä vilkku antavat vähemmän valoa pulssitettuna kuin kiinteällä pulssilla ohjattu vilkku. Kaikissa tapauksissa pulssitettuna ohjatut vilkut ottavat enemmän tehoa kuin kiinteällä, 150ms pulssilla, ohjattu vilkku.



**Kuva 2.** Merivilkkujen valon, tehon ja näiden suhteen vertailua eri ohjauksilla 20(C lämpötilassa. Ensimmäinen palkkiryhmä kuvaa valoa, toinen tehoa ja kolmas näiden suhdetta. Sininen palkki kuvaa kiinteästi ohjattua pulssia, purppura 10ms pulssituksella ohjattua ja keltainen 2ms pulssituksella ohjattua. Pulssin kokonaispituus 150ms + 3000ms.

Verrattaessa vilkun antaman valon ja ottaman tehon suhdetta kaikilla eri ohjaustavoilla havaitaan, että vain punaisilla ja keltaisilla vilkuilla kaikki kolme ohjaustapaa ovat melkein tasaveroisia lämpimissä olosuhteissa. Valkoisella ja varsinkin vihreällä vilkulla pulssitetut ohjaukset ovat selkeästi huonompia kuin kiinteän pulssin ohjaus.



Lämpötilan laskiessa kiinteän ohjaustavan paremmuus korostuu. Lämpötilan muutoksella ei ole huomattavaa merkitystä eri ohjaustapojen keskinäisiin paremmuuksiin.

## 2.3 Yhteenveto

Projektin alussa tehtiin laaja kirjallisuusselvitys asiasta, tulokset tosin eivät kovin paljoa auttaneet nimenomaan tämän projektin ongelmissa.

Mitattiin myös neljän erivärisen LEDin käyttäytymistä jos valopulssi muodostuu lyhyistä osapulsseista.

Tutkittiin ympäristön lämpötilan vaikutusta: Tehty mittauksia sääkaapissa ympäristön lämpötiloissa  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  ja  $-20^{\circ}\text{C}$ . Todettiin, että jatkomittaukset voidaan tehdä huoneenlämmössä.

Projektin (alkuosan) lopputuloksena saatiin mitattua tietoa ledien käyttäytymisestä eri olosuhteissa, jotta lopputuotteiden ohjaussovellutukset voidaan mitoittaa ja suunnitella oikeiksi.

Projektin tulosten avulla voidaan löytää tältä osin kilpailijoita parempia teknisiä ratkaisuja.

Ennen projektin alkua ei ollut olemassa (saatavilla olevaa tietoa) ledien todellisesta käyttäytymisestä ns. vilkkukäytössä. Projektin tämän osan aikana tehtiin kattavat mittaukset niin huoneenlämmössä kuin eri ympäristön lämpötiloissa ja saatiin uutta tietoa jota voidaan suoraan hyödyntää tuotteissa. Osa mittaustuloksista antaa pohjaa projektin II osassa tehtävälle tutkimukselle.

Myös ledien käyttäytyminen ns. pwm-moduloinnissa selvitettiin.

Myös kokonaisella tuotteella (LED 155) tehdyt mittaukset antoivat arvokasta tietoa tuotteen jatkokehityyn.

## 3 Diplomityö: "Teholedien käyttö liikenteen valo-ohjauksessa"

### 3.1 Yleistä

Liikenteen valo-ohjauslaitteisiin soveltuvilta ledeiltä vaaditaan suurempaa tehoa kuin muissa sovelluksissa. Niillä pitää olla myös suuret valovoimat, koska ledien pitää erottua myös kirkkaassa, suorassa auringonvalossa ja näkyä kauas. Lisäksi eri sovelluksiin tarvitaan tietyn aallonpituusalueen ledejä. Aallonpituusalueet on määrätty sovelluskohteen mukaan eri standardeissa, joita ovat muun muassa CIE:n standardi S004-2001, IALA:n värimäärittelyt meripuolen tuotteille, DIN 6163 värimäärittelyt rautatiepuolen tuotteille ja SAE/ECE/JIS värimäärittelyt autotuotteen tuotteille.

Diplomityö alkoi kesällä 2002 ja sen tarkoituksena oli tutkia kesäkuussa 2002 markkinoilla olleita ja markkinoille lähiaikoina tulevia teholedejä. Lisäksi työssä verrattiin näiden ledien valo- ja sähkötekniisiä ominaisuuksia. Työhön kuului myös parhaiden teholedien mittaukset Sabik Oy:n linjavalon LO-1/LED linssin ja poijulyhdyn LED155 linssin kanssa. Linssimittausten keskeinen tavoite oli tutkia mitkä teholedit toimivat

linssien kanssa, ja millä etäisyydellä ledin kärjen pitäisi linssin sisäpinnasta olla, jotta lopputuloksena saadaan mahdollisimman suuri valovoima ja sopiva valonjako. Lisäksi tarkoituksena oli löytää korvaavia teholedejä tuotteessa käytössä oleville Lumiledsin punaiselle HPWT-MH00-L25- ja keltaiselle HPWT-ML00-E25-ledeille.

### 3.2 Tutkimusmenetelmät

Markkinaselvityksessä tutkittiin markkinoilla kesäkuussa 2002 olleita ledejä datalehtien avulla sekä ottamalla yhteys ledien valmistajiin tai maahantuojiin. Ledeistä valittiin mielenkiintoisimmat, ja niistä lähdettiin pyytämään maahantuojiilta kymmentä näytekappaletta/ledityyppi. Näytteitä saatiin lopulta 32 eri ledityypistä, joista mittaukseen valittiin 28 ledityyppiä.

#### 3.2.1 Mittaukset

Mittauksia varten ledejä vanhennettiin aluksi 150 tuntia. Vanhennuksen jälkeen yksittäisille ledeille suoritettiin valo- ja sähkötekniset mittaukset sekä mittaukset Sabik Oy:n linjavalon LO-1/LED ja poijulyhdyn LED155 linssien kanssa.

#### Yksittäisten ledien mittaukset

Yksittäisten ledien mittauksia varten tehtiin teline (3 a), johon koekytkentälevyllä olevat ledit voitiin kiinnittää. Ledit voitiin kiinnittää sekä horisontaali- että vertikaalitasoon ja mittaustelinettä voitiin käänellä vaakasuunnassa eri kulmiin. Mittausten ajaksi muut levyllä olevat ledit peitettiin levyllä, jossa oli lieriön muotoinen reikä, josta mitattava led näkyi (3 b). Mittaustilanteessa teline oli sijoitettu niin, että telineessä oleva led oli 5 m päässä mittaussanturista. Yksittäisistä ledeistä mitattiin valaistusvoimakkuudet 5 m etäisyydellä sekä horisontaali- että vertikaalitasossa viiden asteen välein välillä  $-45^{\circ}$  -  $+45^{\circ}$ . Valovoimien perusteella laskettiin valovirrat eri avaruuskulmissa sekä kumulatiivisen valovirrat välillä  $0 - +45^{\circ}$ . Sähköteknisinä mittauksina tehtiin jännitemittaukset jokaisen ledin yli. Tämän perusteella pystyttiin laskemaan ledien sähköinen teho, koska jokaisen ledin läpi meni datalehdessä määritelty vakionimellistä virta.

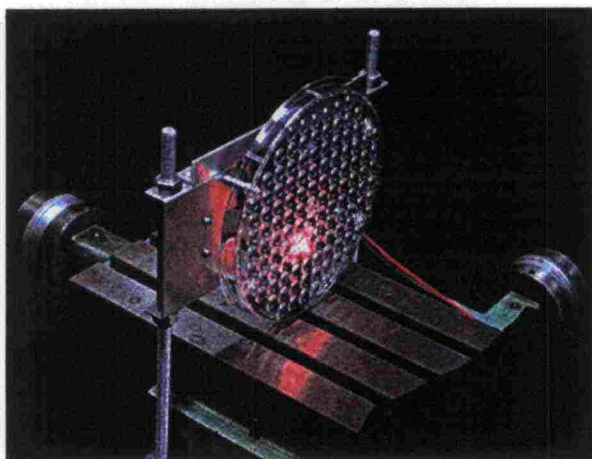




Kuva 3. a) Yksittäisten ledien mittauksissa käytetty teline b) peitelevy.

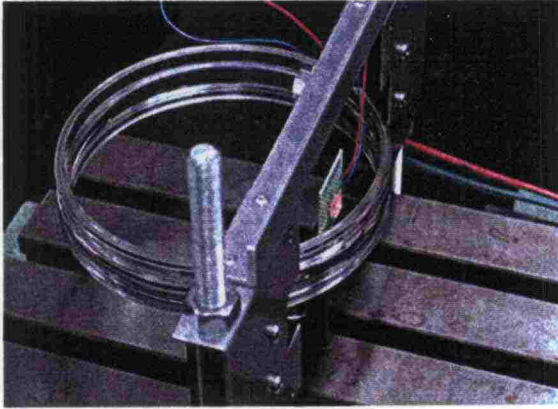
### Mittaukset Sabik-optiikoiden kanssa

Mittauksiin valittiin yhdessä Sabik Oy:n kanssa kymmenen yksittäisten ledien mittauksen perusteella parhaimmalta vaikuttavaa ledtyyppiä. Lisäksi mittauksiin valittiin tuotteissa tällä hetkellä käytössä olevat Lumiledsin punainen ja keltainen led. Näistä punainen led toimi referenssiledinä. Seitsemän valituista kymmenestä ledtyypistä mitattiin Sabik Oy:n linjavalon LO-1/LED linssin kanssa (kuva 4 ) ja kaikki kymmenen Sabik Oy:n poijulyhdyn LED155 linssin kanssa (kuva 5).



Kuva 4. a) Mittauksissa käytetty linjavalolinssi b) Sabik Oy:n linjavalon LO-1/LED.



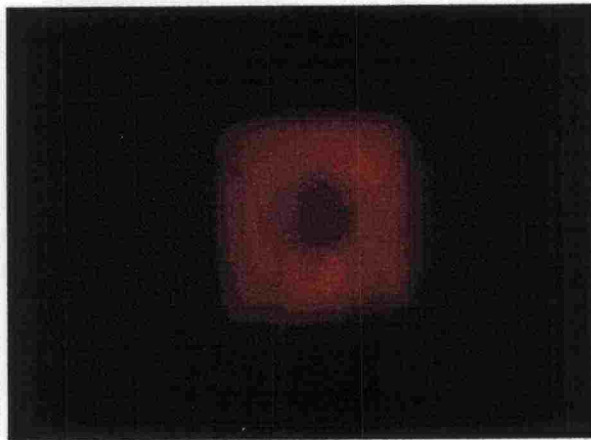


**Kuva 5.** a) Mittauksissa käytetty poijulinssi

b) Sabik Oy:n poijulyhty LED155.

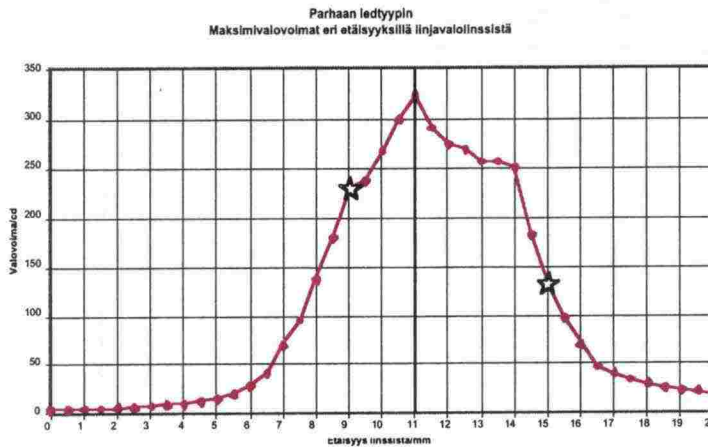
Aluksi mittaukset tehtiin linjavalolinssin kanssa. Mittausten tarkoitus oli selvittää ledin kärjen optimietäisyys linssin sisäpinnasta niin, että saadaan mahdollisimman suuri valovoima ja sopiva valonjako. Valonjaon keskeinen vaatimus oli, että puoliarvokulman pitää olla lopullisessa tuotteessa  $\pm 2^\circ$ . Ensin suoritettiin valonjakomittaus referenssiledinä toimivalle Lumiledsin punaiselle ledille etäisyydellä, jolla kyseistä lediä käytetään tuotteessa tällä hetkellä. Kyseisellä etäisyydellä ja se antaa myös sopivan valonjaon.

Tämä valonjako otettiin tavoitteeksi, kun lähdettiin etsimään sopivaa etäisyyttä muille ledityypeille. Ongelmaksi linjavalolinssimittauksissa tuli se, että sekä Piranhakoteloilla että pintaliitoskoteloilla ledin ollessa fokusetäisyydellä linssistä, led muodosti kotelonsa kuvan seinälle (kuva 6).



**Kuva 6.** Lumiledsin referenssiledin muodostama kotelonsa kuva fokuskohdassa.

Niinpä ledeistä mitattiin maksimivalovoima  $1^\circ$  säteellä nollakulmasta etäisyyksillä 0 - 20 mm 0,5 mm välein. Lisäksi mitattiin valovoima kulmien  $-2^\circ$  ja  $+2^\circ$  kohdalla ja verrattiin tätä arvoa nollakulman läheisyydessä saadulle maksimivalovoimalle. Maksimivalovoimista eri etäisyyksillä piirrettiin kuvaaja (kuva 7), johon merkittiin tähdellä etäisyydet, joissa valonjakokäyrän leveys on haluttu.



**Kuva 7.** Maksimivalovoimat eräälle ledityypille eri ledin kärjen etäisyyksillä linjavalolinssin sisäpinnasta.

Myös poijulinssin kanssa ledejä mitattaessa tehtiin aluksi valonjakomittaus referenssiledille. Mitatusta valonjakokäyrästä huomattiin kuitenkin, että siitä ei pystytty päättämään tuotteen lopullista valonjakoa. Tämä johtuu siitä, että linssiin tulevat muut ledit taivuttavat valoa sivuilta niin paljon, että lopullinen valonjako täyttää puoli-arvokulman  $\pm 3^\circ$ , vaikka sitä ei yksittäisen ledin valonjakokäyrästä pystytäkään päättämään.

Niinpä poijulinssin kanssa mitattiin vain maksimivalovoimat horisontaalitasossa eri ledin kärjen etäisyyksillä poijulinssin sisäpinnasta. Etäisyyttä vaihdeltiin välillä 0 - 20 mm 0,5 mm välein.

### 3.3 Tulokset

Varsinaisia tehokoteloisia ledejä ei markkinoilla ollut vielä montaa eri tyyppiä. Sen sijaan saman tyyppin ledejä oli markkinoilla paljon eri valmistajien eri versioina. Markkinaselvityksen perusteella löytyi monta mielenkiintoista ledityyppiä, joista kaikista ei valitettavasti saatu näytekappaleita. Teholedit soveltuvat hyvin liikenteen valo-ohjauslaitteisiin ja niitä on kehitelty nimenomaan eri sovelluksiin.

Linjavalolinssin kanssa mitatuista ledeistä löytyi tuotteessa tällä hetkellä käytössä oleville ledeille korvaavat ja keltaiselle ledille myös huomattavasti paremmat ledit. Lisäksi tuloksissa huomattavaa oli se, että kaksijalkaiset halkaisijaltaan 5 mm kotelois-



sa olevat ledit eivät sovellu linjavalokäyttöön, koska niiden valonjako kapeimmillaan-kin oli liian leveä tähän käyttöön. Huomattavaa on myös se, että sopivat etäisyydet löytyvät yleensä sen etäisyyden molemmiin puoliin, jolla saadaan suurin maksimivalovoima. Merkittävää on lisäksi se, että näistä sopivista etäisyyksistä lähimpänä linssiä oleva etäisyys antaa huomattavasti suuremman valovoiman (kuva 7). Lisäksi suurinta osaa tutkittavista ledeistä pitäisi siirtää selvästi lähemmäs linssiä kuin tällä hetkellä käytössä oleva led on. Linjavalolinssin tulokset ovat taulukossa 1.

Taulukko 1. Linjavalolinssin kanssa mitattujen, linssin kanssa soveltuvien ledien tulokset.

| Ledityyppi    | Väri | Mitattujen<br>ehojen<br>mediaani<br>mW | Etäisyys<br>linssistä<br>maksimi-<br>valovoimalla<br>/mm | Maksimi-<br>valovoima<br>cd | Soveltuva<br>etäisyys<br>linssistä<br>mm | Valovoima<br>kollakulmassa<br>edellämainitulla<br>etäisyydellä /cd | Soveltuva<br>etäisyys<br>linssistä<br>mm | Valovoima<br>kollakulmassa<br>edellämainitulla<br>etäisyydellä /cd |
|---------------|------|--|--|-----------------------------|--|--|--|--|
| Lumileds      |      |  |  |                             |  |  |  |  |
| HPWT-MR00-L25 | Pun  | 192                                    | 12,5   | 208                         | 11,5                                     | 145  | 14,0                                     | 150  |
| HPWT-ML00-E25 | Kelt | 195                                    | 12,0   | 139                         | 12,5                                     | 90   | 13,5                                     | 101  |
| XXX           |      |  |  |                             |  |  |  |  |
| abcdefg       | Kelt | 167                                    | 11,0   | 159                         | 9,0                                      | 115  | 15,0                                     | 85   |
| YYY           |      |  |  |                             |  |  |  |  |
| ab12345       | Kelt | 141                                    | 11,0   | 323                         | 9,0                                      | 233  | 15,0                                     | 126  |
| cd12345       | Pun  | 147                                    | 11,0   | 159                         | 9,5                                      | 127  | 15,0                                     | 72   |
| ZZZ           |      |  |  |                             |  |  |  |  |
| b1234         | Kelt | 111                                    | 11,5   | 125                         | 12,0                                     | 114  | 15,0                                     | 87   |
| AAA           |      |  |  |                             |  |  |  |  |
| abc0123       | Kelt | 146                                    | 11,5   | 234                         | 9,5                                      | 153  | 10,0                                     | 146  |

Pojjulinssin kanssa mitatuista tuloksista ei voi tehdä suoria päätelmiä, koska lopullis-ta valonjakoa ei pysty yhden ledin tuloksien avulla päättelemään. Kuitenkin näillekin ledeille koottiin taulukkoon suurin maksimivalovoima sekä etäisyys, jolla se saadaan (taulukko 2).

Taulukko 2. Maksimivalovoimat tutkituille ledeille ja se etäisyys poijulinssistä, jolla ne saadaan.

| Ledityyppi    | Väri | Mitattujen<br>tehojen<br>mediaani<br>/mW | Etäisyys<br>linssistä<br>maksimi-<br>valovoimalla<br>/mm | Maksimi-<br>valovoima<br>/cd |
|---------------|------|--|--|------------------------------|
| Lumileds      |      |  |  |                              |
| HPWT-MH00-L25 | Pun  | 192                                      | 12,5   | 23,0                         |
| HPWT-ML00-E25 | Kelt | 195                                      | 12,0   | 16,0                         |
| XXX           |      |  |  |                              |
| hijklmn       | Kelt | 170                                      | 12,0   | 16,8                         |
| abcdefg       | Kelt | 167                                      | 11,0   | 23,3                         |
| YYY           |      |  |  |                              |
| ef12345       | Pun  | 148                                      | 12,5   | 15,8                         |
| gh12345       | Kelt | 149                                      | 12,5   | 19,4                         |
| ab12345       | Pun  | 147                                      | 11, 11,5   | 22,0                         |
| cd12345       | Kelt | 141                                      | 11,5   | 33,8                         |
| TTT           |      |  |  |                              |
| a01234        | Valk | 65                                       | 6.5 - 7.5  | 11,2                         |
| HHH           |      |  |  |                              |
| w01234        | Valk | 70                                       | 7.0 - 8.5  | 13,1                         |
| ZZZ           |      |  |  |                              |
| b1234         | Kelt | 111                                      | 10.5, 11   | 22,0                         |
| AAA           |      |  |  |                              |
| abcd123       | Kelt | 148                                      | 11,5   | 32,0                         |

Maksimivalovoimista horisontaalitasolla eri etäisyyksillä piirrettiin vastaavat kuvaajat kuin linjavalolinssimittauksissakin.

3.4 Yhteenveto

Markkinaselvityksen tuloksena huomattiin, että samantyyppisiä teholedejä on markkinoilla monella eri valmistajalla. Näiden ominaisuudet vaihtelevat jonkin verran valmistajan mukaan, vaikka perustoiminta onkin samanlaista. Tutkimuksessa huomattiin, että esimerkiksi kaikki Piranha-koteloiset puoliarvokulmaltaan samaa suuruusluokkaa olevat ledit toimivat linjavalolinssin kanssa samalla tavalla. Ne eroavat toisistaan vain linssin kanssa mitattaessa saatujen valovoimien osalta. Lisäksi huomattiin, että linjavalolinssin kanssa mitatut keltaiset ledit toimivat linssin kanssa paremmin kuin tällä hetkellä käytössä oleva Lumiledsin keltainen HPWT-ML00-E25-led. Sen sijaan punaiselle HPWT-MH00-L25-ledille ei yhtä hyvää korvaavaa punaista lediä löytynyt. Poijulinssin kanssa mitattuja teholedejä ei voitu vertailla keskenään, koska yhdellä ledillä mitattaessa poijulinssin lopullista valonjakoa ei ole mahdollista päätellä. Niinpä poijulinssillä tehtiin mittaukset vain maksimivalovoimista eri etäisyyksillä.

Diplomityössä tutkituista ledeistä valonjaoltaan leveäkeilaiset ledit kannattaisi mitata myös linjavalolinssin kanssa, koska nykyisin käytössä oleva Lumiledsin punainen led on huomattavasti leveäkeilaisempi kuin työssä kyseisen linssin kanssa mittauksiin valitut ledit. Näidenkin ledien joukosta saattaisi siis löytyä sopivia ledejä linjavalokäyttöön. Lisäksi myöhemmin kannattaisi tutkia esimerkiksi kymmenen ledin testilevyn avulla poijulinssin toiminta eri ledityyppien kanssa. Mittaamisen arvoisia ledejä



olisivat myös markkinoille tulossa olevat ledit ja muut markkinaselvityksessä mukana olleet mielenkiintoiset ledit, joista ei kuitenkaan näytekappaleita saatu.

Diplomityön tuloksena löytyi korvaavat ledit Sabik Oy:n valmistamaan linjavaloon LO-1/LED. Lisäksi todennäköisesti kaikista tutkituista ledeistä löytyy sopivat etäisyydet poijulyhtikäyttöön. Diplomityön tuloksena Sabik Oy:n linjavalossa tullaan käytetty keltainen led todennäköisesti korvaamaan jollakin diplomityössä tutkituista keltaisista ledeistä, koska niiden ominaisuudet olivat huomattavasti paremmat kuin käytössä olevan Lumiledsin keltaisen ledin ominaisuudet. Myös käytössä olevalle punaisellekin ledille löytyi rinnalle korvaava ledtyyppi, jonka ominaisuudet ovat vain jonkin verran heikommät kuin käytössä olevan ledin ominaisuudet.

## 4 Ledin tehollisen valovoiman kokeellinen määrittäminen

### 4.1 Tausta

Vilkkuvaloja käytetään laajalti signaalivaloina, merkkeinä ja varoitusvaloina, koska ne erottuvat ja kiinnittävät huomion paremmin kuin kiinteästi palavat valot. Suurimassa osassa vilkkuvalosovelluksista maalla, merellä, lentosuunnistuksessa tai liikennevalvonnassa käytetään vilkkuvalojen vertailun perusnäkökohtana tehollista valovoimaa. Kun valon kesto on selvästi lyhyempi kuin ympäröivä pimeyden aika, puhutaan välähdyksestä. Jos kokonaiskesto on alle 0,3 sekuntia, ihmissilmä reagoi vain näkökokemuksen kokonaisuuteen välähdyksen aikana. Valonvälähdystä voidaan kuvata parametrilla, jota kutsutaan välähdyksen teholliseksi valovoimaksi. Silmä ei analysoi silmän pinnalle tulevan valovirran hetkellisiä muutoksia valopulssin aikana, vaan reagoi kokonaisvaikutelmaan. Välähdyksellä näyttää olevan pienempi valovoima kuin vastaavalla jatkuvalla valosignaalilla. Kun välähdys on juuri ja juuri näkyvissä, on mahdollista määrittää kvantitatiivinen valon tehokkuus vertaamalla sitä kiinteästi palavaan valoon, joka näkyy samoissa olosuhteissa, samalla alueella ja saman havait-sijan avulla. Joka tapauksessa joka kerta mitattaessa vilkkuvalon tehollista valovoimaa tulokset pitää suhteuttaa katseluolosuhteisiin ja käsitteen käyttämistä pitää välttää suurilla taustan valaistusvoimakkuuden tasoilla.

Koska tällä hetkellä olevat tehollisen valovoiman laskentakaavat perustuvat hehku-lampputyypisillä valonlähteillä tehtyihin kokeisiin, katsottiin oleelliseksi tehdä sup-pea koesarja LED-valoilla.

### 4.2 Mittausjärjestelyt

Eri mittausmenetelmiä lähdettiin kokeilemaan punaisella Lumiledsin nelijalkaisella Piranha-koteloisella HPWT-MH00-L25 ledillä.

Kiinteästi palava ja vilkkuva led asetettiin koelaboratorion takaseinälle hyllylle noin 10 m päähän havainnoijasta. Ledit olivat silmän korkeudella, kun havainnoija istui jakkaralla. Ledit peitettiin varjostimella, jossa oli 3 mm reikä, koska haluttiin varmis-

taa se, että valolähteen vastekulma havainnoijan silmässä oli  $\leq 1^\circ$ . Vilkkuvaa lediä syötettiin eri virroilla niin, että valaistusvoimakkuutta silmän kohdalla voitiin säätää välillä 0,0009 lx - 0,459 lx.

Alustavissa kokeissa todettiin, että kiinteän ledin säätäminen vilkun kanssa yhtä kirkkaaksi osoittautui käytännössä mahdottomaksi, varsinkin jos luminanssi on selvästi kynnyisluminanssia suurempi. Kun kiinteästi palava led oli selkeästi kirkkaampi tai himmeämpi kuin vilkku, kirkkausero oli helppo todeta, mutta lähestyttäessä samoja valaistusvoimakkuuksia oli mahdotonta sanoa, kumpi ledeistä oli kirkkaampi. Niinpä mittaukset päätettiin suorittaa kynnyisluminanssimittauksina erikseen kummallekin ledille.

Mittausolosuhteita kokeiltiin useita, parhaaksi havaittiin hämärissä valaistusolosuhteissa tehdyt mittaukset. Koehenkilö laitettiin istumaan koppiin, jonka seinät olivat läpikuultavaa kangasta. Laboratoriossa oli tällöin muuten pimeää, mutta kopin sivuilla oli sivuvalot (kuva 8). Sopivaksi mittausmääräksi todettiin viisi mittausa/led ja tuloksena otettiin mittausten keskiarvo, joista jätettiin huomioimatta suurin ja pienin arvo.

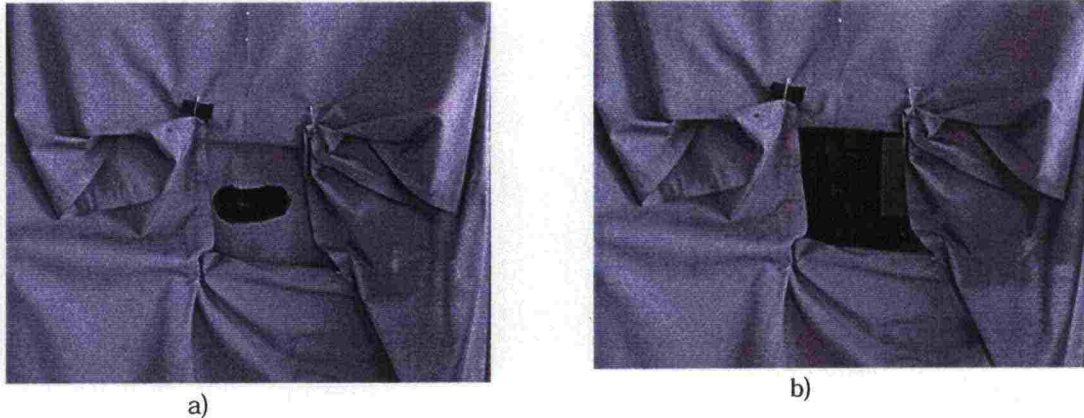


**Kuva 8.** Ledien katseltuun tarkoitettu kangaskoppi toisen puolen sivuvaloineen.



Havainnoijan silmien korkeudelle kiinnitettiin läppä, jossa oli n.12\*6 cm aukko (kuva 2.6a.). Toisena vaihtoehtona käytettiin n. 15\*20 cm aukkoa (kuva 9b). Kopin etuseinä oli n. 50cm päässä havainnoijan kasvoista.

Kun koehenkilö katseli koeledejä, niin silloin em. valaistusolosuhteissa aukon reunoilla oli keskimäärin  $0,08 \text{ cd/m}^2$  luminanssi.



**Kuva 9.** a) Kangaskoppi pienemmällä aukolla b)Kangaskoppi suuremmalla aukolla  
(molemmat kuvat kopin sisältä katsottuna)

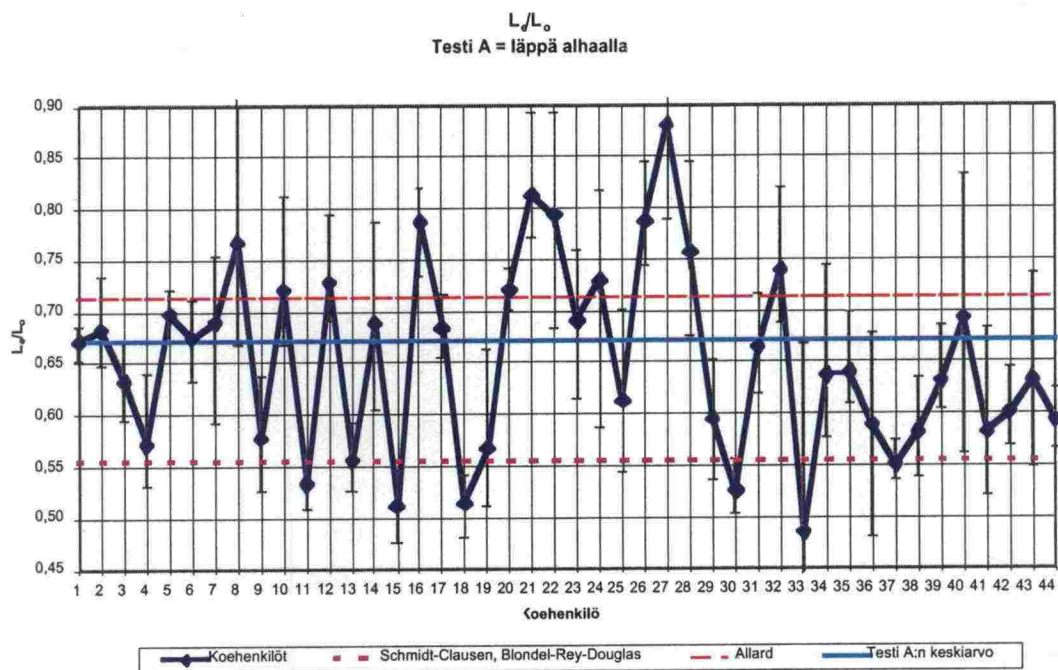
Ensin havainnoijaa pyydettiin säätämään kiinteästi palavan ledin virtaa potentiometrin avulla niin, että hän juuri ja juuri pystyi vielä havaitsemaan ledin. Kun led oli säädetty tällä tavalla, ledin virta kirjattiin ylös ja siitä laskettiin aiemmin mitattujen luminanssien avulla ledin luminanssi sillä hetkellä. Sekä pienemmällä että suuremmalla aukolla tehtiin kummallekin ledille viisi mittausta, joten mittauksia oli yhteensä 20. Koehenkilöitä mittauksessa oli yhteensä 44, joista ikäryhmässä 20 – 29-vuotiaat 23 koehenkilöä ja ikäryhmässä 40 - 49-vuotiaat 16 koehenkilöä. Loput 5 koehenkilöä olivat näiden ikäryhmien ulkopuolelta ja otettiin huomioon mittauksen koosteissa. Pääsääntöisesti koehenkilöillä oli hyvä näkökyky joko silmälaseilla korjattuna tai ilman.

### 4.3 Koetulokset

Tulokset esitetään luminanssien suhteena  $L_e/L_o$  (joka vastaa myös suhdetta  $I_e/I_o$ ), jossa  $L_e$  on kiinteästi palavan ledin luminanssi ja  $L_o$  on ledin kanttiaallon maksimiluminanssi.

Kuvassa 10 on esitetty kaikkien mittaukseen osallistuneiden koehenkilöiden tulokset, kun ledejä katseltiin pienemmästä aukosta (testi A). Lisäksi kuvaan on merkitty Schmidt-Clausenin, Blondel-Rey-Douglasin ja Allardin teoreettiset arvot suhteelle  $L_e/L_o$  kyseisellä kanttipulssilla ( $\tau=250 \text{ ms}$ ). Kuvaan on merkitty myös mittauksen keskiar-

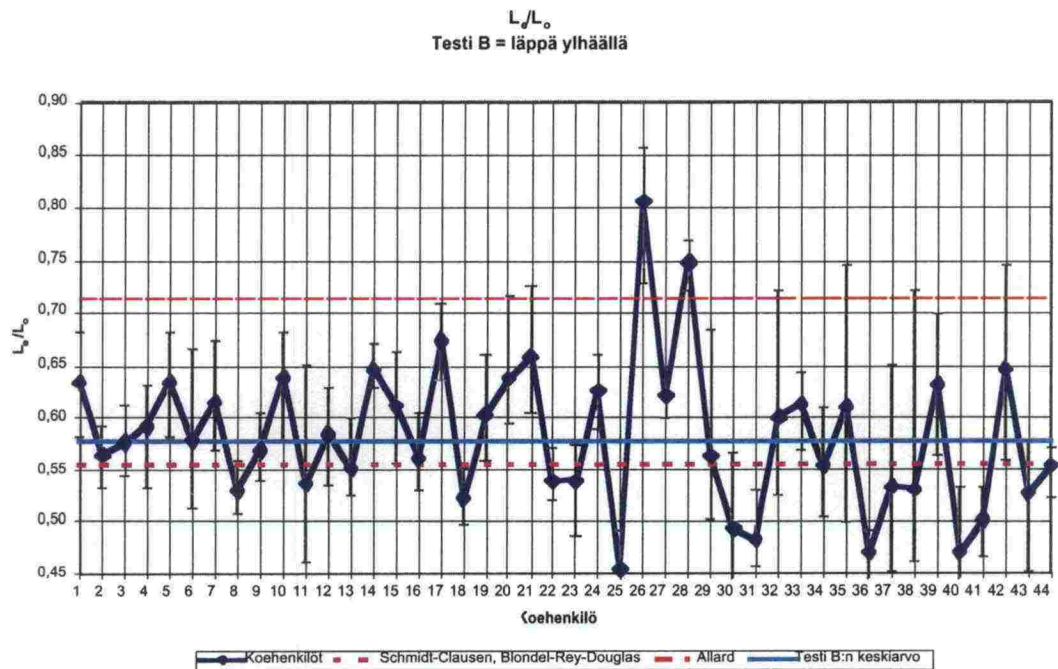
vo ja koehenkilöiden henkilökohtainen mittaustulosten vaihteluväli. Eri henkilöiden mittaustulokset on laskettu kolmen mittauksen keskiarvona



**Kuva 10.** Mittaustulokset kaikkien koehenkilöiden kesken luminanssien suhteena  $L_e/L_o$ , kun ledejä katseltiin pienemmästä aukosta (läppä alhaalla). Kuvaan on merkitty myös virhepalkit, jotka kuvaavat kyseisen henkilön vaihteluväliä.

Kuvassa 11 on mittaustulokset kaikkien koehenkilöiden osalta, kun ledejä katseltiin suuremmasta aukosta. Nämä mittaustulokset painottuvat selvästi enemmän muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta lähemmäs Schmidt-Clausenin ja Blondel-Rey-Douglasin teoreettisia arvoja kuin vastaavat tulokset silloin, kun ledejä katseltiin pienemmästä aukosta. Lisäksi eri mittaustulosten vaihteluväli on hieman pienempi kuin ledejä pienemmästä aukosta katseltuna.





**Kuva 11.** Mittaustulokset kaikkien koehenkilöiden kesken luminanssien  $L_e/L_o$ -suhteena, kun ledejä katseltiin suuremmasta aukosta.

4.4 Yhteenveto

Mittaustulokset poikkeavat toisistaan riippuen siitä, onko ledejä katseltu pienemmästä aukosta vai suuremmasta aukosta. Tulosten keskiarvo on lähempänä Allardin kaavalla saatua laskennallista arvoa, kun ledejä katsellaan pienemmästä aukosta ja suuremmalla aukolla taas lähempänä Schmidt-Clausenin ja Blondel-Rey-Douglasin laskennallisia arvoja. Lisäksi verrattaessa ikäryhmien 20 – 29-vuotiaat ja 40 – 49-vuotiaat mittaustulosten keskiarvoja huomataan, että vanhemmassa ikäryhmässä luminanssien suhde on pienempi kuin nuorempien ikäryhmässä eli vilkun tehollinen luminanssi on noin 60% kiinteästi palavan ledin luminanssista. Tämä ero saattaisi selittyä ikänäöllä.

Ainakaan näiden mittausten perusteella ei pysty päättelemään, mikä teoreettisista arvoista vastaa lähinnä totuutta. Kuitenkin se voidaan päätellä, että todellisuudessa ledien  $L_e/L_o$ -suhde on välillä 0,55 – 0,71, toteutetussa mittauksissa keskiarvo oli noin 0,63. Lisäksi todettiin, että verrattaessa yhtä aikaa sekä vilkkuvaa että kiinteästi palavaa lediä toisiinsa, eroja ledien luminanssissa on liki mahdoton huomata.